

레이저 형광법에 의한 프로세싱 플라즈마 중의 수소원자 계측

박 원주^o, 박 성근, 이광식, 이동인
영남대학교 전기공학과

Measurement of Hydrogen Atoms in a Processing Plasma using Laser Induced Fluorescence

Won-Joo Park^o, Sung-Gun Park, Kwang-Sik Lee, Dong-In Lee
Department of Electrical Engineering Yeungnam University

Abstract

During measurement of atomic hydrogen in a silane plasma using two-photon excited laser induced fluorescence, laser-induced dissociation of the gas was observed. This was investigated until conditions for the input laser fluence were determined where the effect was negligible.

A measurement of the atomic hydrogen distribution was then performed within the limits of these conditions. Absolute density determinations showed atomic hydrogen densities of around $3 \times 10^{17} \text{m}^{-3}$.

1. 서론

유한한 에너지의 유효 이용을 위해 1차 에너지의 탈화석화가 인류의 공통과제로 인식되고 있으며, 특히 핵연료의 안전보장, 지구의 온온화 등의 환경문제, 코스트 등에 많은 관심을 갖고 있다.

최근 청정 대체에너지의 하나인 태양전지발전에 의한 태양광에너지의 이용은 수소를 연료로한 핵융합 발전과 더불어 주목되어 지고 있다. 태양전지를 위한 소자는 결정실리콘(c-Si)과 아모르페스 실리콘(a-Si)으로 대별된다. 아모르페스실리콘은 결정실리콘에 비해 충분한 태양광 흡수계수를 얻을 수 있어 대면적화와 저코스트가 가능하다.

현재 플라즈마 CVD(Chemical Vapor Deposition)법에 의한 아모르페스실리콘 박막은 대출력 태양전지발전을 실현하기 위한 소자로서 주목되고 있다. 이법에 의해 생성된 태양전지 박막의 성능 향상에 관한 연구가 진행되고 있으며, 특히 Si박막의 생성과정에 있어서 성막이 형성될때 기판상의 수소원자는 기판표면에 도달한 라디칼(1~5)의 표면화산 작용을 증대시킨다고 알려져 있다. 이러한 성막시의 수소원자 거동을 명확히 하여, 그 역할을 이해하는 것은 생성시키는 박막 성능 향상 및 최적 반응조건을 알아 내는데 중요하다.

본 연구는 원 위치(in-situ)에서 시간·공간 분해능이 우수한 레이저 형광법을, 태양전지 박막 제작을 위한 프로세스 플라즈마인 RF 글로우 방전 SiH_4 플라즈마 중의 수소원자 밀도 계측에 적용 가능성을 고찰하고자 한다.

II. 2광자 여기 레이저 형광법의 원리

1. 2광자 여기 레이저 형광법의 원리(6-9)

본 계측법은 Fig.2-1에서와 같이 수소원자를 기저준위와 $n=3$ 준위(3s, 3d상태)의 에너지 차에 2광자적으로 공명하는 레이저광(파장205.3nm)으로 강하게 여기하고, $n=2$ 준위(2p상태)로 완화 할 때 H_α 선(파장656.3nm)의 형광을 관측한다. 이때 레이저 형광법에 있어서 형광관측의 기본적인 모델을 Fig.2-2에 나타낸다. 플라즈마중의 산란단면적Vs에 존재하는 수소원자에 레이저 광을 입사하면 3준위에 있는 개수의 증가 $\Delta N_3(t)$ 에 비례해서 형광이 발생한다. 이것을 수광업체각 $\Delta\Omega$ 로 집광해서 산란장을 결정하는 스톱으로 제한하고, H_α 필터로 분광해서 광전자증배관(PMT)으로 전기신호로 변환한다.

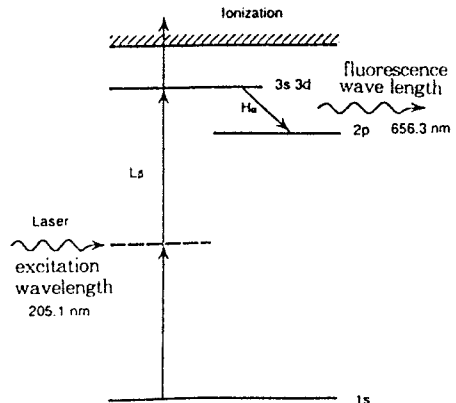


Fig. 2-1 Energy level of hydrogen atomic

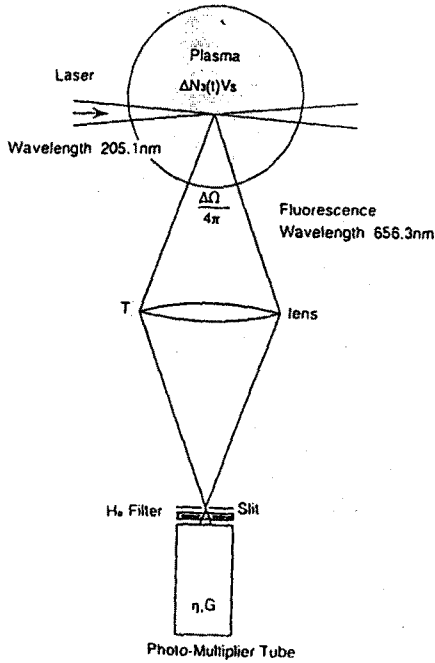


Fig. 2-2 Component of fluorescence

2. 신호강도와 수소원자밀도의 관계

형광관측에 광전자증배관을 이용하면 형광신호강도 (V)는 다음 식에서 구해진다.

$$SFL = \Delta N_3(t) \cdot V_s \cdot A_{32} \cdot \frac{\Delta\Omega}{4\pi} \cdot T \cdot \eta \cdot G \cdot e \cdot G_L \quad (2-1)$$

- $\Delta N_3(t)$: 레이저광을 입사한 것으로 부터 관측체 적내의 $n=3$ 의 준위의 수소 원자 밀도 증분 (m^{-3})
- V_s : 산란체적 (관측장L × 빔단면적; m^3)

- A_{32} : 아인슈타인A계수 ($6.4 \times 10^7 s^{-1}$)
- $\Delta\Omega$: 수광입체각
- T : 광학계 전체의 투과율
- η : 광전자증배관의 광전면의 양자효율
- G : 광전자증배관의 전류증배율
- e : 전자의 소전하 ($1.6 \times 10^{-19} C$)
- R_L : 부하저항

III. 실험장치

2광자여기에 필요한 광원은 ArF 엑시머 레이저광의 증수소 가스중에서 1차 스톱스 광의 발생으로 부터 얻었다. 실험에 사용한 실험장치를 Fig. 3-1에 나타내었다.

플라즈마장치는 용량결합형고주파 글로우방전으로 SiH_4 플라즈마를 발생하고 방전주파수는 13.56 MHz, 최대 출력은 100 W 이다. 진공용기는 스테인레스제로서 내경 400mm, 높이 300 mm의 원통형이고, 진공용기 중앙부에 스테인레스제의 원판형의 평행평판 전극(직경 100mm, 전극간극 40mm)을 상하에 배치했다. 상측 전극이 RF 전극으로 배칭박스에 연결되어 전력이 공급되어진다. 하측 전극은 막막을 생성하기 위해서 기판을 설치했다. 이 전극은 성막시에 기판온도의 제어가 되도록 히타를 내장했다. 압력은 전리진공계, 바리톤론, 피라니계이므로 측정했다. 진공용기 측면에 레이저 입사 및 형광 관측을 위해 관측창을 설치했다. 창은 a-Si 막막의 부착으로 더러워지는 것을 막기 위해 샷타를 부착하였다. 또 진공용기 전체가 상하방향으로 이동이 될 수 있도록 하여 광학계 및 플라

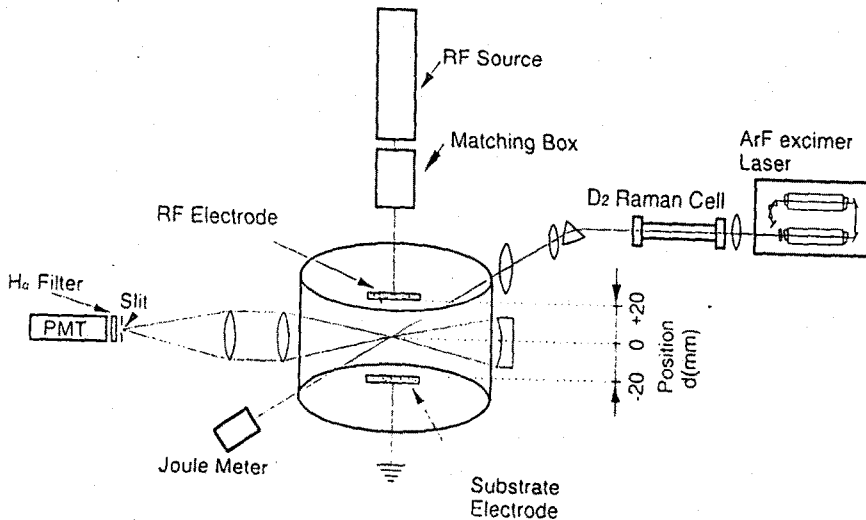


Fig. 3-1. Arrangement of the laser fluorescence system installed on an RF-sustained plasma processing reactor for atomic hydrogen density measurements

즈마 상태가 흔들림없이 전극간의 수소원자 밀도 분포를 계측할 수 있는 구조가 되도록 했다.

SiH₄ 가스는 O₂와 접촉되면 반응이 일어나 폭발의 위험성이 있기 때문에 안전성에 충분히 고려하여 Ar 가스를 SiH₄ 가스 배관과 막 성장실등의 파지를 행했다. 프로세스 가스는 정밀한 유량 조절을 위해 매스프 로콘트롤(MFC)을 통해서 막 성장실에 도입했다. 가스배기는 터보분자펌프(TMP), 매카니칼브스다펌프(MBP)의 2계통으로 배기하였다. 각각의 로타리펌프(RP)의 가스 배기측에는 SiH₄을 회색하기 위해 다량의 N₂가스를 흘리면서 실험을 행했다.

IV. 실험결과 및 고찰

1. 레이저에 의한 사이렌 가스 해리의 영향을 무시할수 있는 조건

레이저 입사가 수소원자밀도 계측에 미치는 영향을 무시할 수 있는 조건을 결정하기 위하여 SiH₄ 가스의 해리로부터 생성되는 수소원자 밀도 N_{Hdis}(m⁻³)과 레이저 파워 밀도 F_L(MW/mm²)과의 관계를 관측한 결과를 Fig. 4-1 에 나타내었다. 이들 관계를 식 4-1으로 놓을 수 있다.

$$N_{Hdis} = N_{SiH_4} \alpha_{dis} F_L \quad (4-1)$$

Fig 4-1로부터 식 4-1의 비례정수인 $\alpha_{dis} = 2.2 \times 10^{-5}(\text{mm}^2/\text{MW})$ 로 구할 수 있다. 레이저에 의해 해리되는 수소원자의 밀도 N_{Hdis}가 본 계측 시스템의 검지하한 N_{Hlimit} 과 같게 될때, 결국

$$N_{Hdis} = N_{Hlimit} \\ (= 100/\alpha_{ex} \cdot F_L^2 V_s (\Delta\Omega/4\pi)T) \quad (4-2)$$

를 만족할 때의 레이저 파워 밀도가 레이저에 의한 해리의 영향을 무시할 수 있는 최대의 레이저 파워 밀도 F_{L,max}라고 생각된다.

식 4-2의 α_{ex} 는 2광자 여기의 여기효율, V_s는 관측체적, $\Delta\Omega$ 는 수광입체각, T는 광학계의 투과율이다. 검지하한의 형광 광자수를 100개로하여 본 시스템의 검지하한으로 했다. 수치를 넣어 계산한 결과 F_L = 0.8(MW/mm²)를 구할 수 있다.

2. 수소 원자 밀도 계측에 적용

레이저광에 의한 분자 및 래디칼의 해리의 영향이 없는 조건은 전질에서 계측에 사용 가능한 최대 레이저 플루언스 (F_L)_{max}을 구했다. 2광자 여기에는 레이저 플루언스를 낮게하면 그 이송에 비례하게 되어 형광강도가 감소하게 되므로, 이러한 조건하에서 충분한 신호강도가 얻어지지 않으면 본 계측법으로 사이렌 플라즈마 중의 수소원자 계측을 할 수 없다. 그러므로, 레이저 플루언스 0.4(MW/mm²)에서 전극간의 수소원자 밀도 분포를 측정된 결과를 Fig 4-3에 나타내었다. 이것은 r=930mm의 렌즈를 이용하여 레이저광을 집광한 경우 관측 위치의 레이저 에너지는 0.7mJ이다. 플라즈마의 조건은 SiH₄ 가스유량 5SCCM, 압력은 15mTorr, RF방전 파워는 20W이다. 전극간의 수소원자 밀도의 질대치는 3x10¹⁷m⁻³ 이다. 사이렌 가스

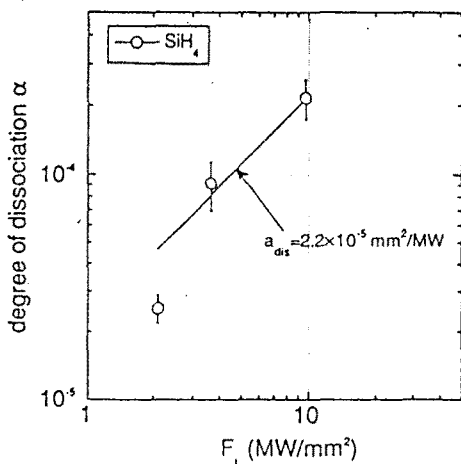


Fig. 4-1 Degree of dissociation, α , of SiH₄ caused by a probing laser beam for two-photon excitation of hydrogen atoms as a function of the laser fluence.

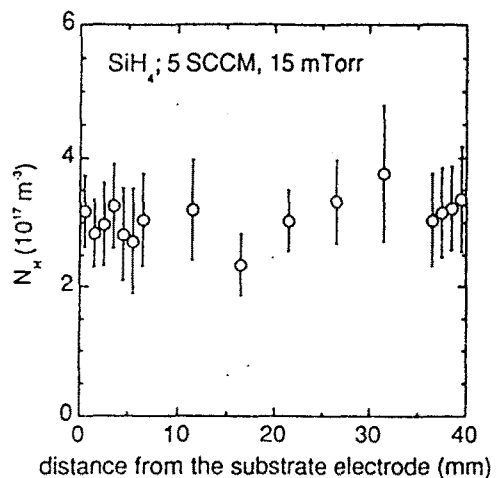


Fig. 4-2 Atomic hydrogen density between the electrodes in a silane plasma obtained under the condition that dissociation of the gas by the laser beam was negligible.

압이 40mTorr 을 넘으면, 기판전극 부근에 신호강도가 급격하게 증가하는 현상이 관측 되었다. 이 원인은 분명하지는 않지만 미분체의 발생에 의한 것이라고 생각되어 진다.¹⁰⁾

V. 결론

본 논문은 2광자 여기 레이저 형광법을 a-Si:H 박막 생성에 이용되는 사이렌 플라즈마 중의 수소원자 밀도 측정에 적용시키기 위해서, 본 연구에서 결정한 레이저 광에 의한 프로세서 가스의 해리가 문제되지 않는 레이저 플루언스를 구하고, 전극간 수소원자 밀도 분포를 측정했다. 본 연구의 결과는 다음과 같다.

1) 레이저 입자가 수소원자 밀도 측정에 미치는 영향을 무시할 수 있는 레이저 플루언스는 $F_{1,2} = 0.8 \text{ (MW/mm}^2\text{)}$ 이다.

2) 레이저 플루언스 $0.4 \text{ (MW/mm}^2\text{)}$ 에서 전극간의 수소원자 밀도 분포를 측정한 결과, 수소원자 밀도는 약 $3 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ 에서 분포되어 있음을 알 수 있다.

참고문헌

- 1) A. Matuda and K. Tanaka : J. Appl. Phys. 60(1986)2351
- 2) K. Tachibana, T. Okuyama, H. Harima, and Y. Urano : Proc. 7th Int. Symp. Plasma Chem.(Eindhoven, 1985)588
- 3) N. Itabashi, K. Kato, N. Nishiwaki, T. Goto, C. Yamada, and E. Hirota Jpn. J. Appl. Phys. Pt. 2 27(1988)588
- 4) K. Kato, N. Itabashi, N. Nishiwaki, and T. Goto : Phys. Lett. 48(1986)695
- 5) K. Tanaka, and A. Matuda : Materials Science Report, 2(1987)139
- 6) 岡野大佑 : 九州大學總合理工學研究科 博士論文
- 7) T. Kajiwara, M. Inoue, T. Okada, K. Muraoka, M. Akazaki, and M. Maeda Jpn. J. Appl. Phys. 24(1985)870
- 8) J. Boker, R. R. Freeman, J. C. White and R. H. Shorz : Phys. Rev. A24(1981)612
- 9) 朴元柱 : 九州大學總合理工學研究科 博士論文 (1992)
- 10) G. M. Jellum and D. B. Graves : J. Appl. Phys. 67(1990)649